Op-amp als spanningsvolger

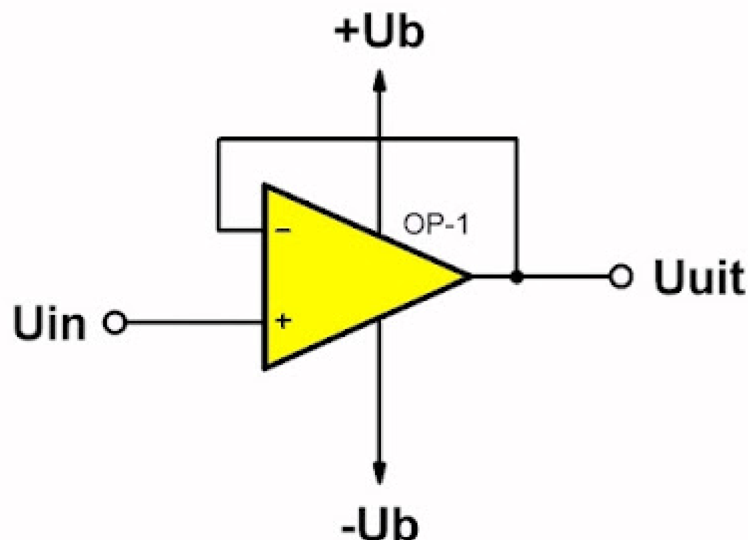
Spanningsvolgers hebben een spanningsversterking van een. Op-amp's zijn ideale onderdelen voor het samenstellen van zo'n spanningsvolger. Bovendien kunt u met wat extra's de specificaties aanzienlijk verbeteren.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 19-09-2022

Basisschakeling en eigenschappen

Wat is een spanningsvolger?
De spanningsvolger is een schakeling die een spanningsversterking van 1 heeft. Het signaal op de uitgang is dus een exacte kopie van het signaal op de ingang. Een tweede eigenschap van de schakeling is dat de ingangsweerstand heel groot is en de uitgangsweerstand heel laag. Vandaar dat deze schakeling ook wel eens '*weerstandstrafo*' of '*buffer*' wordt genoemd. Het ingangssignaal wordt gebufferd en staat onder precies dezelfde vorm, maar over een zeer lage weerstand, ter beschikking voor verdere verwerking.

De basisschakeling van een op-amp spanningsvolger
Het basisschema van een spanningsvolger met op-amp is getekend in de onderstaande figuur. Het ingangssignaal wordt rechtstreeks aangeboden aan de niet-inverterende ingang (+) van de op-amp. De inverterende ingang (-) gaat rechtstreeks naar de uitgang.



Het basisschema van een op-amp als spanningsvolger.
(© 2022 Jos Verstraten)

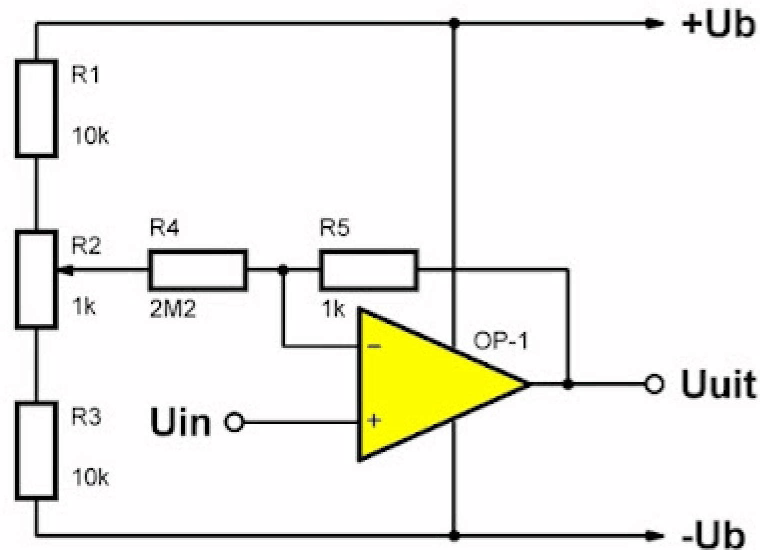
De spanningsversterking van de schakeling
Deze grootheid is gelijk aan een:
$U_{in} = U_{uit}$
Dat is gemakkelijk te begrijpen als u rekening houdt met een van de basiseigenschappen van een teruggekoppelde operationele versterker. De schakeling zal zichzelf zo instellen dat de spanning op de inverterende ingang gelijk wordt aan de spanning op de niet-inverterende ingang. Het zal dan onmiddellijk duidelijk zijn dat dit tot gevolg heeft dat de uitgangsspanning

gelijk wordt aan de ingangsspanning.
In realiteit is de spanningsversterking iets kleiner dan een, maar het verschil is zo klein dat u dit in vrijwel alle gevallen kunt verwaarlozen. Een praktische waarde voor de spanningsversterking is 0,995.

De ingangsweerstand van de schakeling
De verklaring van de zeer hoge ingangsweerstand volgt uit hetzelfde verschijnsel. Tussen beide ingangen kunt u een denkbeeldige weerstand veronderstellen. Deze weerstand bepaalt in hoge mate de ingangsweerstand van de versterker. Nu staat er aan beide aansluitingen van deze weerstand dezelfde spanning. Het gevolg is dat er geen stroom door de weerstand vloeit en dat de ingangsweerstand dus in principe oneindig is. In principe, omdat er in een praktische schakeling wel iets minder versterkt wordt dan de eenheid. Er bestaat dus toch een heel klein spanningsverschil tussen beide ingangen en er vloeit dus ook een zeer kleine stroom door de interne weerstand tussen beide ingangen. Deze kleine stroom is er de oorzaak van dat de ingangsweerstand niet oneindig is, maar zeer groot. Zelfs met een ouderwetse maar nog veel gebruikte bipolaire op-amp zoals een 741 kunt u waarden in het GΩ-bereik realiseren.

De uitgangsweerstand van de schakeling
Ook de zeer lage uitgangsweerstand volgt uit de spanningsgelijkheid tussen beide ingangen. Als de schakeling belast wordt zal er een spanning vallen over de inwendige weerstand. Het gevolg is dat de uitgangsspanning zou willen gaan dalen. Maar daar deze spanning rechtstreeks wordt teruggekoppeld naar de inverterende ingang zou er dan een spanningsverschil tussen de twee ingangen ontstaan. De op-amp zal nu onmiddellijk reageren door zijn versterking te verhogen. Het gevolg is dat de spanningsgelijkheid tussen de twee ingangen wordt hersteld en de uitgangsspanning dus weer gelijk wordt aan de ingangsspanning.
Voor de buitenwereld lijkt het er op alsof de op-amp een zeer lage uitgangsweerstand heeft.

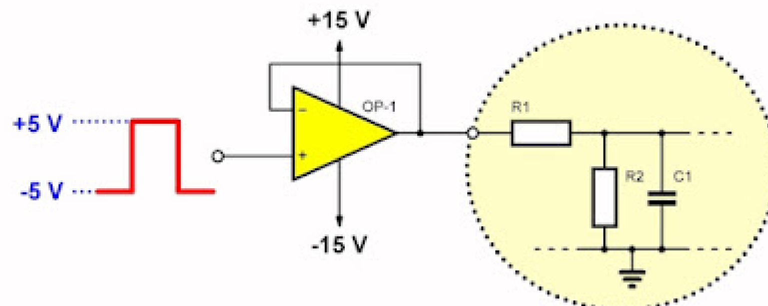
Offset compensatie van de spanningsvolger
De offset van een op-amp is het zeer klein intern spanningsverschil tussen beide ingangen als deze extern met elkaar worden verbonden. Die offsetspanning bedraagt niet meer dan een paar mV. Maar omdat een op-amp een hoge versterking heeft kan dit klein spanningsverschil toch voor grote problemen zorgen. Vaak moet u deze offset compenseren door een van de ingangen op een kleine gelijkspanning aan te sluiten die zó groot is dat het intern spanningsverschil wordt gecompenseerd.
Enkelvoudige operationele versterkers hebben meestal twee aansluitingen waartussen u een schakeling kunt aansluiten voor het compenseren van de offset van het IC. Gebruikt u echter twee- of viervoudige op-amp IC's, dan zijn dergelijke aansluitingen niet aanwezig. U moet dan gebruik maken van een externe offset compensatie. Een bruikbaar schema daarvoor is getekend in de onderstaande figuur. De inverterende ingang wordt via een hoge weerstand R4 verbonden met de loper van een veel laagohmigere instelpotentiometer R2 die met twee identieke serieweerstanden R1 en R3 tussen beide voedingsspanningen is opgenomen. Met een veel kleine terugkoppelweerstand R5 wordt voorkomen dat de spanning die de offset van de op-amp moet compenseren afvloeit naar de lage uitgangsweerstand van het IC.



Compenseren van de offset. (© 2022 Jos Verstraten)

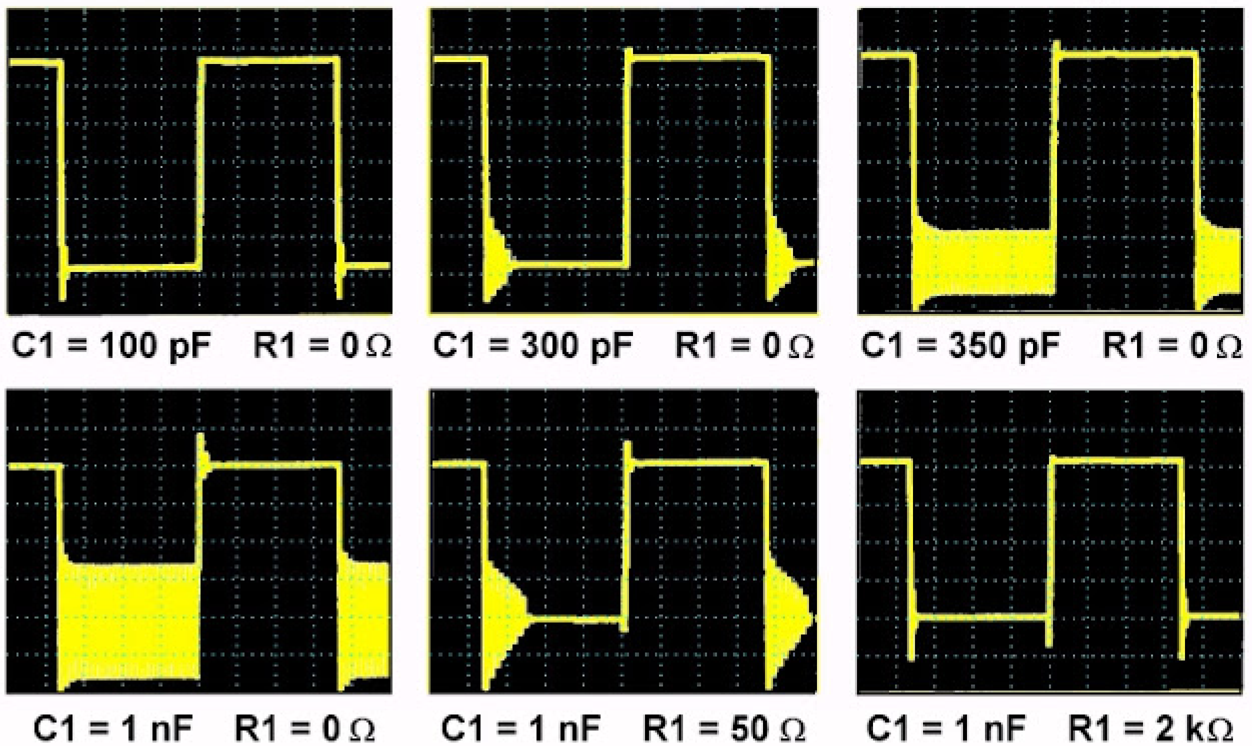
Overigens hebt u bij de spanningsvolger niet erg veel last van de offset. Vanwege de rechtstreekse terugkoppeling tussen uitgang en inverterende ingang is de spanningsversterking gelijk aan 1. Ook de offsetspanning wordt dus niet versterkt, zodat u alleen te maken hebt met de eigen niet versterkte offset van de toegepaste op-amp. Deze ligt in het mV-bereik!

Frequentie compensatie van de spanningsvolger
De basisschakeling van de allereerste figuur zult u in de praktijk niet vaak aantreffen. In het échte leven wordt iedere schakeling belast door de serieschakeling van een weerstand en een condensator, zie de onderstaande figuur. Deze condensator C1 is de parasitaire bedradingscapaciteit van de schakelingen die op de uitgang van de spanningsvolger zijn aangesloten.



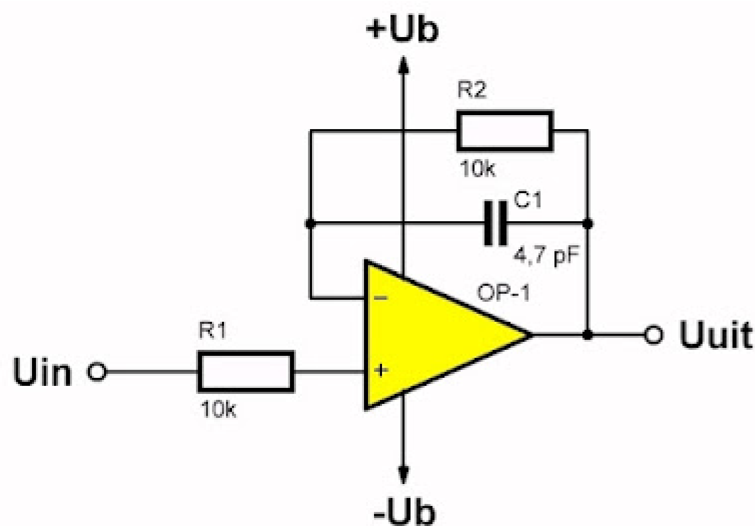
De belasting in de praktijk. (© 2022 Jos Verstraten)

Als u aan een dergelijke praktische schakeling een snelle pulsvormige spanning legt, dan zal er op de uitgang een parasitaire oscillatie verschijnen. De amplitude van deze oscillatie en de uitslingeringstijd ervan zijn afhankelijk van de mate van capacitieve belasting van de schakeling. In de grafieken van de onderstaande figuur zijn zes voorbeelden van dit verschijnsel getekend. Hieruit blijkt duidelijk dat zelfs bij een capacitieve belasting van slechts enige honderden pF het uitgangssignaal ernstig verontreinigd wordt!



Invloed van de belasting op de uitgangsspanning. (© 2022 Jos Verstraten)

Om dit verschijnsel te voorkomen moet u enige extra componenten aanbrengen, zoals getekend in de onderstaande figuur. Hoewel de exacte waarde van deze drie componenten is te berekenen adviseren wij u gebruik te maken van de beroemde '*cut and try*'-methode. Gebruik uw functiegenerator en uw oscilloscoop om in uw typische toepassing de exacte waarden experimenteel te bepalen. Onze ervaring is dat dit het beste werkt. De waarden in de figuur zijn als richtlijn te gebruiken.



Het compenseren van de capacitieve belasting.
(© 2022 Jos Verstraten)

Verbeteren van de ingangskarakteristieken

Inleiding
Het basisschema van de spanningsvolger met een operationele versterker heeft al zeer gunstige ingangseigenschappen. Toch kan het bij sommige toepassingen noodzakelijk zijn deze specificaties nog verder op te voeren. In de volgende paragrafen worden enige daarvoor bruikbare technieken toegelicht.

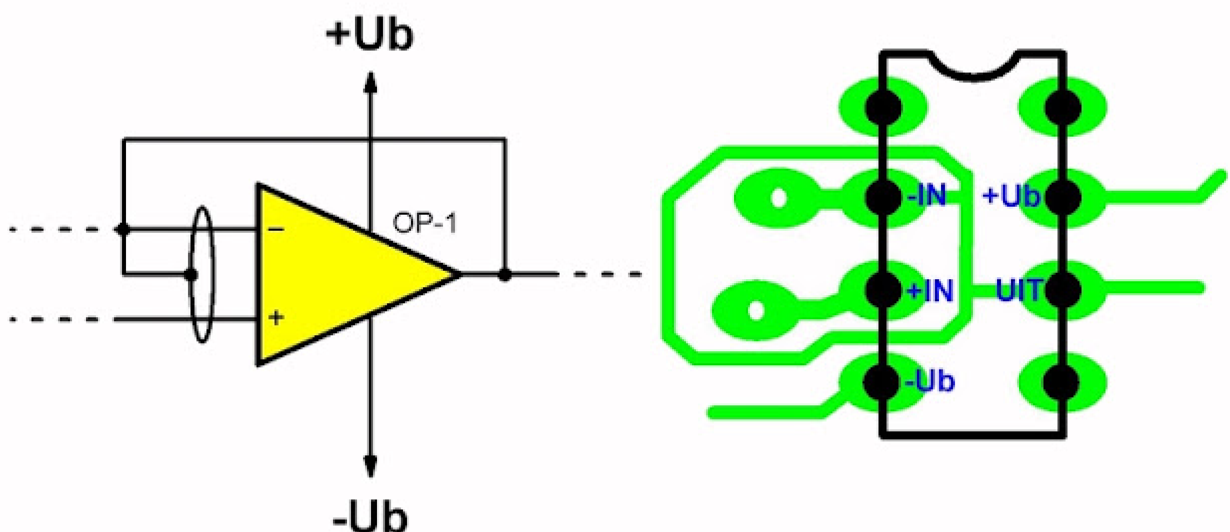
Guarding bij een spanningsvolger

Met operationele versterkers met FET-ingangen kunt u de spanningsvolger een ingangsweerstand geven die ver in het 100 GΩ bereik ligt. In de praktijk is het echter zeer moeilijk om dergelijke waarden te handhaven. De op-amp zweeft immers niet in een of ander inert, volledig watervrij gas, maar zit gesoldeerd op een print. Nu heeft een print een bepaalde oppervlakteweerstand die veroorzaakt wordt door vervuiling van het printmateriaal, soldeerflux en condenseren van waterdamp uit de lucht. Deze effecten zorgen ervoor dat de praktische ingangsweerstand veel lager ligt dan deze die in feite haalbaar is. Hebt u een toepassing waarbij een zeer hoge ingangsweerstand heel belangrijk is, dan kunt u de genoemde effecten voor een deel compenseren door '*guarding*' toe te passen. Guarding is een speciale printtechniek waarbij de punten op de print die zeer hoogohmig moeten zijn worden afgeschermd van de omgeving.

Rond deze punten wordt een koperen geleider aangebracht, die op hetzelfde potentiaal wordt gezet als de af te schermen punten. Belangrijke voorwaarde daarbij is dat deze ring laagohmig is. Het zal duidelijk zijn dat een spanningsvolger een ideale schakeling is om te guarden. De uitgangsspanning van de schakeling voldoet immers aan de guarding-voorwaarden. De uitgang staat op dezelfde spanning als de ingang en heeft bovendien een zeer lage weerstand.

Het guarding-schema is getekend in de onderstaande figuur. De guarding rond de twee ingangen wordt aangegeven door een cirkeltje rond de lijnen te tekenen. Deze cirkel is verbonden met de laagohmige uitgang van de spanningsvolger. Hoe deze guarding in de praktijk op de print wordt gerealiseerd volgt uit de rechter schets. Rond de twee aansluitingen van de ingangen wordt een ringvormige trace aangebracht. Deze ring omsluit niet alleen de twee ingangspennen van de op-amp, maar ook de pad's van de onderdelen die met deze pennen zijn verbonden zijn. Deze guarding-ring gaat via een trace naar de uitgang van de op-amp en met een andere trace naar de inverterende ingang.

Het zal duidelijk zijn hoe deze guarding werkt. Kruipstromen over het oppervlak van de print kunnen nu niet meer ontstaan tussen de hoogohmige ingangen en een punt dat op een afwijkende spanning staat. Beide ingangen zijn immers volledig omgeven door de ring die op dezelfde spanning staat. Het is nu eenmaal zo dat tussen twee punten die op dezelfde spanning staan geen stroom kan vloeien! De effecten van printverontreinigingen op de ingangsweerstand van de spanningsvolger worden dus gecompenseerd. Dit verhaal geldt uiteraard uitsluitend voor het gelijkspanningsgedrag van de schakeling. Als er wisselspanning in het spel is spelen ook allerlei parasitaire capaciteiten een rol.

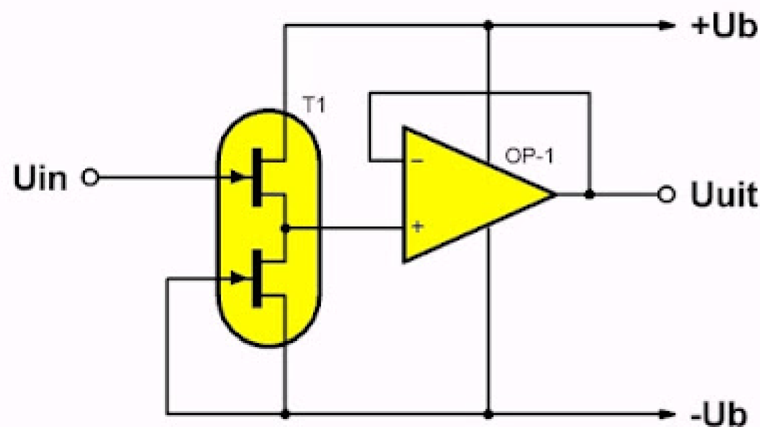


Het principe van guarding bij een spanningsvolger. (© 2022 Jos Verstraten)

Het verhogen van de ingangsweerstand door middel van FET's

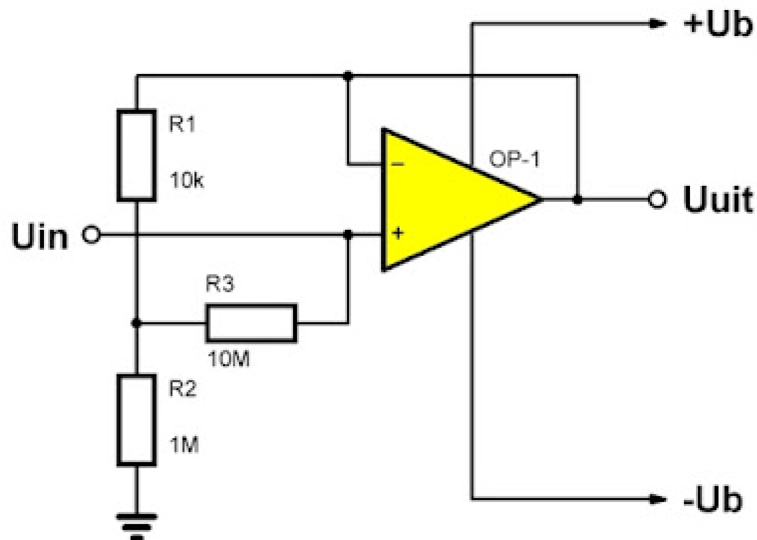
Voor bepaalde zeer kritische toepassingen kan het noodzakelijk zijn de ingangsweerstand van een spanningsvolger toch nog te verhogen. Er moeten dan externe schakelingen rond de

ingangen van de op-amp worden opgebouwd. De meest eenvoudige oplossing is getekend in de onderstaande figuur. De niet-inverterende ingang van de op-amp wordt vooraf gegaan door een dubbele FET zoals een 2N5196. De onderste FET is als stroombron geschakeld die de stroom door de bovenste FET vastlegt. Omdat beide FET's identieke eigenschappen hebben en op dezelfde temperatuur staan kunt u stellen dat de gate/source-spanningen van beide halfgeleiders identiek zijn. Het middelpunt van de beide FET's zal daardoor op hetzelfde potentiaal staan als de ingang. De op-amp zorgt er met zijn hoge ingangsweerstand immers voor dat de gelijkheid van beide drainstromen niet wordt verstoord.
Met dergelijke schakelingen zijn ingangsweerstanden in het TΩ-gebied in theorie haalbaar. Maar het zal duidelijk zijn dat dan de allerhoogste eisen worden gesteld aan het printontwerp en dat u guarding moet toepassen!



Het verhogen van de ingangsweerstand door het voorschakelen van een dubbele FET. (© 2022 Jos Verstraten)

Het verhogen van de schijnbare ingangsweerstand door middel van bootstrapping
Het gebruik van de standaard schakeling van een spanningsvolger heeft als nadeel dat de ingang alleen verbonden is met de niet-inverterende ingang van de op-amp met zijn zeer hoge ingangsweerstand. Sommige ingangsschakelingen willen echter een relatief kleine weerstand '*zien*' tussen hun uitgang en de massa. U kunt dan gebruik maken van het zogenaamde '*bootstrapping*'-principe. Dat is een handigheid die stamt uit de buizenperiode van de elektronica. Bij dit systeem staat er een relatief kleine weerstand tussen de ingang en de massa, maar wordt de uitgang ook teruggekoppeld naar deze ingang, waardoor er minder stroom uit dit punt kan afvloeien naar de massa. Het basissysteem van bootstrapping bij een moderne spanningsvolger met een operationele versterker is getekend in de onderstaande figuur. De uitgang van de schakeling gaat naar een spanningsdeler R1/R2. De verhouding tussen beide weerstanden moet groot zijn. Het knooppunt tussen beide weerstanden wordt via een weerstand R3 verbonden met de niet-inverterende ingang.

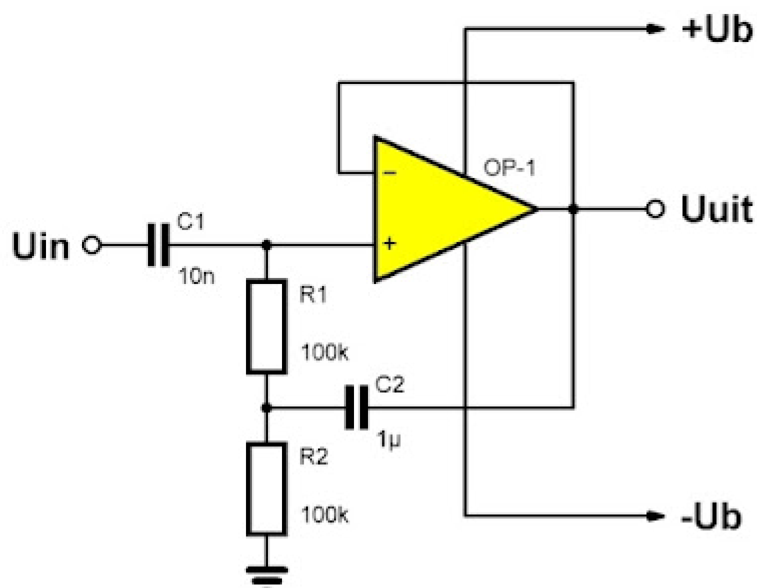


Het bootstrappen van de ingang van een operationele versterker. (© 2022 Jos Verstraten)

Bij bestudering van het schema lijkt het alsof de ingangsweerstand van de schakeling slechts 11 MΩ bedraagt. Tussen de ingang en de massa staan immers de weerstanden R2 en R3 in serie geschakeld. Als de schakeling actief wordt, dan zal de terugkoppeling van de uitgang naar de niet-inverterende ingang er echter voor zorgen dat het knooppunt van de weerstanden R1 en R2 op vrijwel hetzelfde potentiaal als de uitgang komt te staan. Dat is per definitie ook de spanning die op de ingang staat. Over weerstand R3 valt dus vrijwel geen spanning met als gevolg dat er nauwelijks stroom doorheen loopt. De ingangsspanning '*ziet*' dus nu een zeer hoge schijnbare ingangsweerstand. Met een aloude 741 kan men op een dergelijke manier een spanningsvolger maken met een ingangsweerstand van meer dan 10 GΩ.

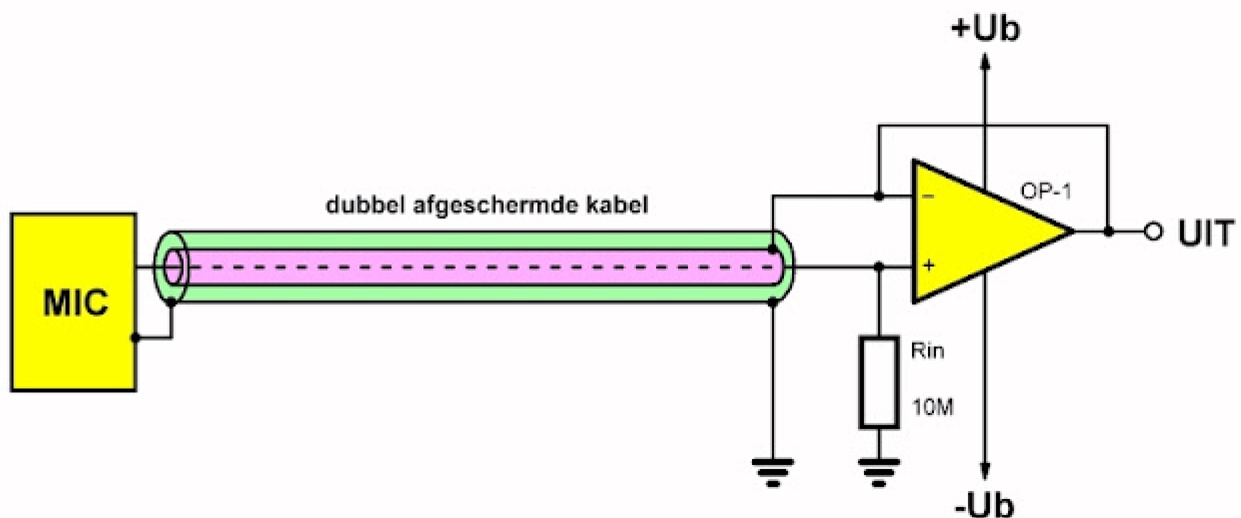
Bootstrapping bij signaalbuffering

In de onderstaande figuur is een praktische schakeling getekend van een spanningsvolger met bootstrapping die u kunt gebruiken voor het afsluiten van laagfrequent schakelingen. Door het gebruik van het bootstrap principe kunt u met een zeer kleine koppelcondensator van slechts 10 nF werken, terwijl toch de laagfrequent signalen onverzwakt door de schakeling gaan.



Het bootstrappen van een LF-versterker. (© 2022 Jos Verstraten)

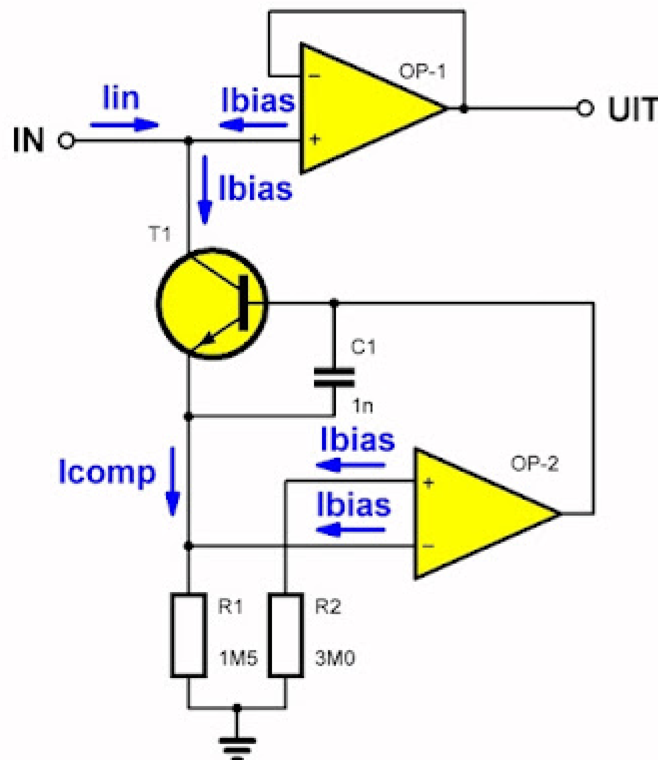
Kabel bootstrapping met een spanningsvolger
U kunt het besproken bootstrap principe ook gebruiken als u hoogohmige schakelingen door middel van een lange afgeschermde kabel met een apparaat moet verbinden. De meest logische gang van zaken is dat u in die schakeling een spanningsvolger opneemt en de zeer laagohmige uitgang op de afgeschermde kabel aansluit. De kabelcapaciteit zal dan niet erg veel invloed hebben op het signaal. Maar dat is echter niet altijd mogelijk. Denk maar aan een hoogohmige microfoon. Als u daar een schakeling wilt inbouwen, moet ofwel batterijen gebruiken om deze schakeling te voeden of de voedingsspanningen via de kabel overbrengen.
Een oplossing voor dit probleem is getekend in de onderstaande figuur. U hebt hiervoor een kabel nodig met een dubbele afscherming. De uitgang van de spanningsvolger wordt niet alleen verbonden met de inverterende ingang van de operationele versterker, maar ook met de binnenste afscherming van de kabel. Dat is in feite niets anders dan het toepassen van guarding op de kabel. Tussen de afgeschermde ader van de kabel en deze afscherming staat nu immers geen spanningsverschil, met als gevolg dat de parasitaire capaciteit van de kabel geen invloed op het signaal heeft. De tweede uitgang van de microfoon wordt verbonden met de metalen behuizing van de microfoon, met de buitenste afscherming en met de massa van de schakeling. Op deze manier is het mogelijk een hoogohmige microfoon zonder buffering bij de microfoon via een tien meter lange kabel met een versterker te verbinden, zonder dat de hoge frequenties door de capaciteit van de kabel worden verzwakt.



Het toepassen van bootstrapping op een dubbel-afgeschermde kabel.
(© 2022 Jos Verstraten)

Het compenseren van de biasstroom
Een operationele versterker heeft een bepaalde biasstroom I_{bias}. Dat is de stroom die uit de ingang vloeit naar de op de ingang aangesloten schakeling. Deze stroom is zeer klein, afhankelijk van het type op-amp ligt de waarde van deze stroom in het µA- tot nA-gebied. Bij bepaalde kritische toepassingen kan het vloeien van deze stroom echter bezwaarlijk zijn. Te denken valt aan schakelingen met fotodetectoren, waarbij de detector een zeer kleine stroom I_{in} levert die recht evenredig is met het licht dat op de detector invalt. De biasstroom zal dan tot gevolg hebben dat de stroom die door de detector geleverd wordt niet meer recht evenredig is met de lichtintensiteit. Bovendien is de biasstroom van een operationele versterker afhankelijk van de temperatuur. Daardoor gaat het evenredige verband tussen de uitgangsstroom van de detector en het gemeten verschijnsel helemaal verloren.
Hebt u ooit te maken met dit soort problemen, dan kunt u de schakeling van de onderstaande figuur toepassen. De bovenste operationele versterker is de spanningsvolger die het onderdeel afsluit dat een stroom I_{in} levert. De op-amp zélf levert een biasstroom I_{bias}. Zonder compensatie zou deze stroom zich van de ingangsstroom aftrekken. De onderste operationele versterker levert echter een afvoerpad voor deze biasstroom. De schakeling gaat er van uit dat beide operationele versterkers dezelfde biasstroom hebben. Dat is het

geval als u een dubbele op-amp toepast. De schakeling rond de onderste op-amp is niets anders dan een stroombron, die ervoor zorgt dat de collectorstroom I_{comp} van de transistor T1 precies gelijk is aan de waarde van de biasstroom.

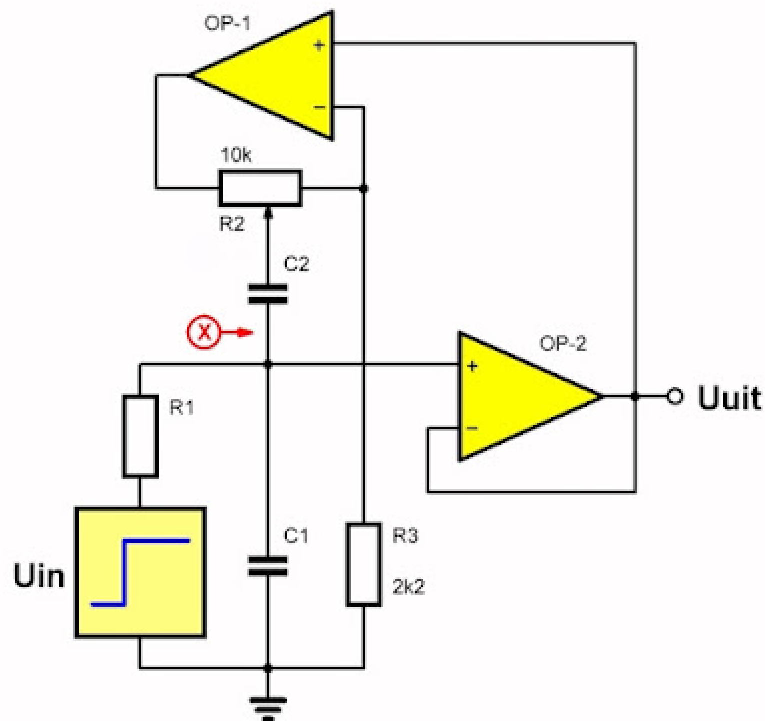


Het compenseren van de biasstroom van een spanningsvolger op-amp.
(© 2022 Jos Verstraten)

De werking berust alweer op het feit dat de op-amp de spanning op beide ingangen identiek wil maken. De niet-inverterende ingang van de onderste op-amp OP-2 gaat via een weerstand R2 van 3 MΩ naar de massa. De biasstroom uit deze ingang zal over deze weerstand een bepaalde spanning opbouwen. De inverterende ingang gaat via een weerstand R1 van 1,5 MΩ naar de massa. Let op de 1/2 verhouding tussen beide weerstanden. De biasstroom die uit de inverterende ingang vloeit zal dus over deze weerstand een spanning opwekken die gelijk is aan de helft van de spanning over de 3 MΩ weerstand. Er bestaat dus een spanningsverschil tussen beide ingangen en de op-amp zal dit spanningsverschil tot nul gaan reduceren. De uitgang van de op-amp stuurt de basis van de transistor T1. Deze halfgeleider gaat geleiden, met als gevolg dat er een bepaalde collectorstroom I_{comp} gaat lopen. Deze stroom wekt echter over de weerstand van 1,5 MΩ een spanningsval op.
De schakeling stelt zichzelf zo in dat de spanning over de weerstand van 1,5 MΩ gelijk wordt aan de spanningsval over de weerstand van 3 MΩ. Dat kan alleen maar als er door de eerste weerstand een stroom vloeit die het dubbele is van de stroom die door de weerstand van 3 MΩ vloeit. De collectorstroom wordt dus ingesteld op de waarde van de biasstroom. Deze collectorstroom kan alleen afkomstig zijn van de bovenste operationele versterker. Als u ervan uitgaat dat alle biasstromen aan elkaar gelijk zijn, dan zal de biasstroom van de spanningsvolger OP-1 volledig via de transistor naar de massa afvloeien en zal dus geen effect hebben op de stroom I_{in} die door de ingangsschakeling wordt geleverd. Noteer dat deze schakeling rekening houdt met de variatie op de biasstroom in functie van de temperatuur!

Capacitieve neutralisatie met een spanningsvolger
Met de in de vorige paragrafen beschreven technieken kunt u al heel wat doen aan capacitieve problemen tussen de spanningsvolger en de schakeling die op de ingang wordt aangesloten. Met bootstrapping en guarding kunt u de kabelcapaciteit en de capaciteit van de print uitschakelen. Wat overblijft is echter de capaciteit van de bron zélf. Deze kan tot gevolg hebben dat het signaal dat de bron levert behoorlijk vervormt. Denk maar weer aan een zeer

gevoelige fotodetector die per definitie een groot halfgeleidend oppervlak heeft. Dergelijke detectoren hebben een niet te verwaarlozen capaciteit en deze capaciteit kan de uitgangspulsjes van de detector verzwakken. Om dergelijke problemen op te lossen kunt u de spanningsvolger die de detector afsluit uitrusten met een systeem dat een zogenaamde '*capacitieve neutralisatie*' uitvoert. Het basisprincipe van dit systeem is getekend in de onderstaande figuur.



Capacitieve neutralisatie van de capaciteit van de ingangsbron.
(© 2022 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling is in feite alleen wiskundig te doorgronden, maar met onderstaande redenering kunt u een heel eind komen. Als de bron U_{in} een puls levert zal een deel van deze spanning afvloeien via het netwerk R1/C1 en niet via de buffer OP-2 op de uitgang terecht komen. De spanning op punt X is dus geen nauwkeurige representatie van de bronspanning. Dat verschijnsel ontstaat doordat de capaciteit C1 van de bron oplaadt. De oplaadstroom vloeit via de weerstand R1, de inwendige weerstand van de bron, er ontstaat een spanningsval over dit onderdeel.
Het compensatienetwerk, opgebouwd rond de bovenste operationele versterker OP-1, levert nu via de condensator C2 een compensatiestroom die gebruikt wordt om de condensator C1 op te laden. De oplaadstroom wordt dan niet meer geleverd door de bron, zodat er over weerstand R1 geen spanning valt. De mate van neutralisatie kan ingesteld worden met behulp van de instelpotentiometer R2. Deze moet u zo instellen dat de spanning die via de condensator C2 wordt teruggekoppeld gelijk is aan:
$U_f = (1 + C1/C2)$
In de praktijk kunt u dit uiteraard het best experimenteel bepalen met behulp van een oscilloscoop.

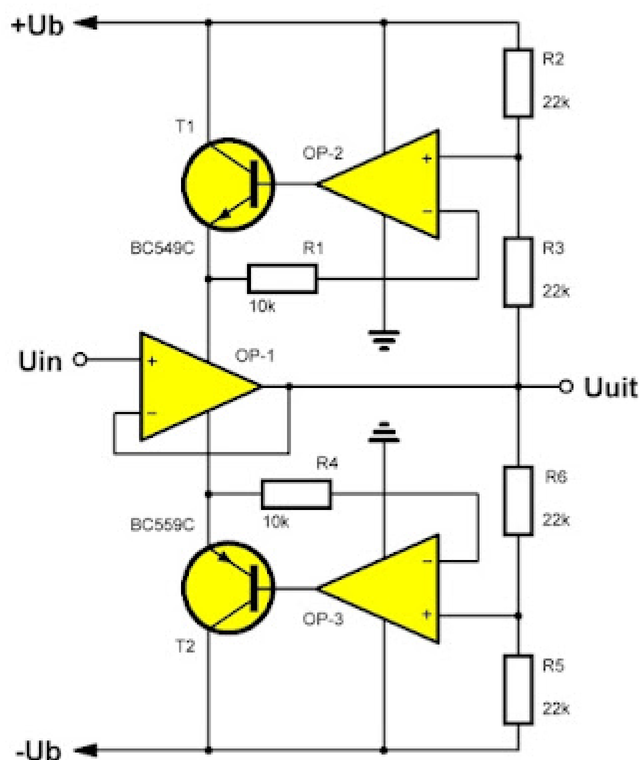
Verbeteren van de uitgangskarakteristieken

Inleiding
Wat de uitgangskarakteristieken betreft doet het standaardschema het niet slecht. Maar ook hier geldt dat u de specificaties, met name het uitsturingsbereik en de te leveren stroom, met eenvoudige hulpschakelingen aanzienlijk kunt verbeteren.

Bootstrapping van de voeding

De meeste operationele versterkers kunnen gevoed worden uit een maximale spanning van 36 V. Werkt u symmetrisch, dan betekent dit dat u de schakeling uit maximaal ±18 V kunt voeden. Het gevolg is dat de schakeling geen signalen kan verwerken die een grotere top-tot-top waarde hebben dan ongeveer 30 V. De meeste operationele versterkers zijn immers niet volledig uit te sturen tot tegen de beide voedingsspanningen! Er moet nog voldoende spanningsreserve tussen de uitgangsspanning en de voedingsspanningen overblijven om de interne schakelingen te sturen.

Er bestaat een zeer ingenieus systeem om het uitsturingsbereik van een operationele versterker groter te maken dan zijn voedingsspanningen. Dit systeem noemt men '*bootstrapping van de voeding*'. Het principe is getekend in de onderstaande figuur. OP-1 is de op-amp die wordt gebruikt als spanningsvolger. De voedingsaansluitingen gaan niet rechtstreeks naar de $+U_b$ en de $-U_b$, maar via transistoren T1 en T2. Deze transistoren worden gestuurd uit twee hulp op-amp's OP-2 en OP-3. De bovenste hulp op-amp wordt gevoed tussen $+U_b$ en de massa, de onderste tussen de massa en $-U_b$. U kunt nu de voedingsspanningen verhogen tot ±36 V. Voor de twee hulp op-amp's geldt dat deze dan ieder 36 V voedingsspanning te verwerken krijgen, hetgeen toelaatbaar is.



Bootstrappen van de voeding van een spanningsvolger.
(© 2022 Jos Verstraten)

Hoe dat zit met OP-1 moet even worden bekeken. Stel dat aan de ingang van de spanningsvolger een spanning van 0 V wordt aangelegd. De uitgang van de schakeling zal dan ook op 0 V staan. De niet-inverterende ingang van OP-2 is via een spanningsdeler R2/R3 ingesteld op de helft van de positieve voedingsspanning. De schakeling zal zichzelf nu zo inregelen dat dezelfde spanning op de inverterende ingang staat. Dat kan alleen als de positieve voedingsspanning van OP-1 op de helft van de positieve voedingsspanning staat, dus op +18 V. Deze spanning wordt immers rechtstreeks teruggekoppeld naar OP-2. Hetzelfde verhaal geldt voor de negatieve voedingsaansluiting van OP-1. Deze staat op een spanning van -18 V.

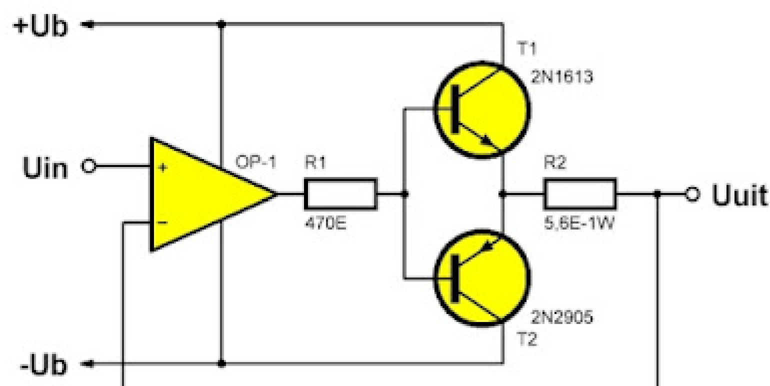
De situatie verandert dramatisch als er op de ingang van de spanningsvolger een signaal wordt gelegd. Stel dat er +5 V op de ingang wordt gezet. De uitgang zal ook naar +5 V gaan. De spanningsdelers naar de ingangen van de twee hulp op-amp's worden nu anders ingesteld. De bovenste staat nu tussen +36 V en +5 V, zodat er over de deler maar 31 V staat. Over iedere weerstand valt 15,5 V, het gevolg is dat de niet-inverterende ingang nu

wordt ingesteld op +20,5 V. Het regelsysteem zorgt er voor dat ook de spanning wordt op de positieve voedingsaansluiting van OP-1. Bij de onderste spanningsdeler staat er nu 41 V over de weerstanden. Over iedere weerstand valt 20,5 V, zodat de niet-inverterende ingang van OP-3 op een spanning van -15,5 V komt te staan. Door het onderste regelmechanisme wordt dat ook de spanning op de negatieve voedingsaansluiting van OP-1.
Conclusie: OP-1, de spanningsvolger, wordt nu niet gevoed tussen +18 V en -18 V, maar tussen +20,5 V en -15,5 V. Hoewel de totale voedingsspanning nog steeds 36 V bedraagt heeft het voedingsbereik zich positief verschoven. Op deze manier kunt u OP-1 veel verder uitsturen, omdat in het ultieme positieve geval OP-1 gevoed wordt tussen +36 V en 0 V en in het ultieme negatieve geval tussen 0 V en -36 V.

Het vergroten van het uitgangsvermogen

Inleiding
Een op-amp heeft een zeer beperkte stroomcapaciteit aan de uitgang. Wilt u een op-amp spanningsvolger belasten met een lage afsluitweerstand, dan moet u aan de uitgang van de schakeling externe onderdelen aanbrengen die de stroomcapaciteit opvoeren. Daarvoor bestaan diverse schakelingen, die nu in het kort worden besproken.

De complementaire eindtrap zonder ruststroom
De eenvoudigste manier om uit een spanningsvolger meer stroom te leveren is de uitgang van de operationele versterker af te sluiten met een complementaire eindtrap. Het basisschema is getekend in de onderstaande figuur. De uitgang van OP-1 gaat via een kleine weerstand R1 naar de basissen van twee complementaire transistoren. Deze staan in serie geschakeld tussen beide voedingsspanningen. De gemeenschappelijke emitter-aansluiting is de uitgang van de schakeling. Het is absoluut noodzakelijk de schakeling te beschermen tegen kortsluiting van de uitgang. Vandaar de kleine weerstand R2, die de stroom door de eindtransistoren beperkt. De uitgang wordt weer rechtstreeks teruggekoppeld naar de inverterende ingang van de op-amp.
De uitgangsstroom die deze schakeling kan leveren wordt bepaald door het soort transistoren dat u gebruikt. Niet alleen hun maximale collectorstroom en hun maximale vermogen speelt een rol, maar ook hun stroomversterking. De stroomversterking van de halfgeleiders moet zo groot zijn dat de uit de uitgang van de op-amp getrokken basisstromen binnen het bereik van de op-amp vallen, ook bij maximale uitgangsstroom.
De weerstand R1 is noodzakelijk om de schakeling te stabiliseren tegen oscillatieneigingen. Deze weerstand beperkt de basisstroom van de eindtransistoren en daarmee dus ook de collectorstromen.



De spanningsvolger afsluiten met een complementaire eindtrap.
(© 2022 Jos Verstraten)

Niet geschikt voor sinussignalen
Deze schakeling heeft een bepaalde dode zone rond de nul. Als de ingangsspanning 0 V is

zullen beide transistoren sperren. Stel dat de ingangsspanning wordt verhoogd tot +0,3 V. In principe zou men dezelfde spanning op de uitgang van de op-amp moeten terug vinden. Maar dan zouden de transistoren nog steeds sperren! Deze gaan immers eerst geleiden als er meer dan 0,56 V tussen basis en emitter staat. De uitgang van de schakeling zou dus op 0 V blijven staan. Maar dan ontstaat er een spanningsverschil tussen de twee ingangen van de op-amp. Het gevolg is dat het interne regelmechanisme in werking treedt en de op-amp zijn uitgang zo ver positief maakt dat de bovenste transistor gaat geleiden. Dat regelproces gaat door tot er op de uitgang van de schakeling een spanning van +0,3 V staat. Dan wordt weer voldaan aan de spanningsgelijkheid tussen beide ingangen. Op dat moment staat er ongeveer 0,9 V op de uitgang van de op-amp.
Door het regelsysteem van de op-amp wordt de dode zone, oftewel de cross-over vervorming van de eindtrap geëlimineerd. Dat gaat echter alleen goed bij lage frequenties. Boven 10 kHz zal de op-amp niet snel genoeg zijn om de dode zone zonder vervorming op de uitgang te compenseren. Vanwege deze dode zone is deze schakeling niet zo geschikt voor het verwerken van sinussignalen, zoals gebruikelijk in audioschakelingen. Maar u kunt deze schakeling wel gebruiken voor het besturen van kleine gelijkstroommotoren in modelbouw.

Een eindtrap zonder cross-over vervorming
In de onderstaande figuur is een schakeling getekend die absoluut vrij is van cross-over vervorming. De eindtrap bestaat nu uit twee complementaire PNP/NPN-combinaties. Nu vloeit er een ruststroom door de eindtransistoren T3 en T4. De waarde van deze ruststroom wordt bepaald door de weerstanden R1 en R2. Door het tussen schakelen van de weerstanden R4 en R5 is de schakeling extra gestabiliseerd tegen temperatuursverloop. Als namelijk de ruststroom zou stijgen zal de spanningsval over deze weerstanden toenemen.



Een eindtrap zonder cross-over vervorming. (© 2022 Jos Verstraten)

Het gevolg is dat de basis/emitter-spanningen van de twee eindtransistoren kleiner worden en dat de ruststroom stijging wordt tegengewerkt. Dat systeem is ook bekend van laagfrequent eindversterkers en werkt uitstekend. De PNP/NPN-combinaties hebben een zeer grote stroomversterking. Het gevolg is dat deze schakeling in staat is stromen te leveren in het ampère-bereik. Door de specifieke opbouw van de schakeling zal de uitgangsspanning van de op-amp klein blijven, ook bij maximale uitsturing. De op-amp levert namelijk basisstroom aan T1 en T2 en geen spanning. Vandaar dat deze schakeling een vrij groot frequentiebereik heeft, omdat de beperkte stijgtijd van de op-amp niet zo'n grote rol speelt.

Bandbreedtes tot 5 MHz zijn zonder al te grote problemen te realiseren, bij stijgtijden van 10 V/µs.